

DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKÜNE MARUZ TABAKALI KOMPOZİT PLAKLARIN DENEYSEL ve NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Züleyha ASLAN* **Ramazan KARAKUZU****

(*) Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü SİVAS-zuleyaslan@cumhuriyet.edu.tr

(**) Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü İZMİR-ramazan.karakuzu@deu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, düşük hızlı darbeye maruz fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin dinamik davranışını değerlendirmektir. Nümerik olarak hesaplanan temas kuvveti-zaman değerleri, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerde darbe hızının, darbe kütlelerinin, kompozit plağın boyutlarının önemi belirlenmiştir. Darbe testleri 1 m/sn, 2 m/sn ve 3 m/sn' lik artan darbe hızlarında ve 135 g ve 2600 g'lık darbe kütlelerinde yapılmıştır. Karşılıklı iki tarafı ankastre ve diğer iki tarafı serbest olan 50 mm'ye 150 mm, 100 mm'ye 150 mm ve 150 mm'ye 150 mm'lik plaklar ile deneyler yapılmıştır ve darbe yükü her bir plağın merkezine uygulanmıştır. Deneylerde 8 tabakalı $(0^0/0^0/90^0/90^0)_s$ fiber oryantasyonuna sahip ve 4.8 mm kalınlığında E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit plakalar kullanılmıştır. Zamana bağlı dinamik sonlu eleman analizi yapabilen 3DIMPACT programını kullanarak tabakalı kompozitlerin nümerik değerlendirmesi de yapılmıştır. Kompozit plak ve çarpan eleman arasındaki temas kuvveti, plağın merkezindeki maksimum düşey yer değiştirme, darbe esnasındaki gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler zamanın fonksiyonu olarak elde edilmiş ve nümerik hesaplamalarla kompozit tabakaların delamination hasarı belirlenmiştir.

ABSTRACT

The purpose of this study is the evaluation of the dynamic behavior of fiber reinforced laminated composites under low velocity impact. The numerically computed contact force history is compared with the same experimental results. The importance of the impact velocity, the impactor mass and the dimensions of the composite plate are determined for laminated composites subjected to low velocity impact. Impact tests are performed at increasing impact velocities 1 m/sec, 2 m/sec and 3 m/sec, and impactor masses of 135 gr and 2600 gr. The studies have been carried out with plate dimensions of 50 mm by 150 mm, 100 mm by 150 mm and 150 mm by 150 mm with two opposite sides clamped and the other two free and the impact load is applied at the center of each plate. $(0^0/0^0/90^0/90^0)_s$ oriented cross-ply E-glass/epoxy laminated composite of 4.8 mm nominal thickness is used for impact testing. A numerical evaluation of these specimens is also carried out by using 3DIMPACT

transient dynamic finite element analysis code. The contact force between the impactor and the composite plate, maximum transverse deflection at the center of the plate, stresses and strains during impact are plotted as functions of time and the predicted delamination sizes of composites are determined numerically.

1. GİRİŞ

Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler üstün özelliklerinden dolayı son yıllarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fakat bu malzemeler düşük hızlı darbe yüküne maruz kaldıklarında geleneksel metalik malzemelerden çok farklı davranırlar. Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozit malzemenin darbeye maruz kalan yüzeyinde gözle görülen herhangi bir hasar oluşmaz iken, malzemenin iç kısmında matris çatlağı, fiber kırılması ve delamination yani tabakalar arası ayrışma gibi hasarlar meydana gelebilir ve bu hasarlar tabakalı kompozit malzemenin mukavemetini ve rijitliğini önemli derecede düşürür. Bu nedenle son yıllarda birçok araştırmacı tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı üzerine çalışmaktadır.

Dinamik yüke maruz kompozit malzemeler üzerine ilk çalışmalar Rotem ve Lifshitz [1], Lifshitz [2] ve Sierakowski vd. [3] tarafından yapılmıştır. Daha sonra Sierakowski ve Chaturvedi [4] ve Abrate [5] farklı test metodları ve darbe modelleri üzerine çalışmışlardır. Sankar [6] temas kuvveti, temas süresi ve darbeye maruz tabakalı kompozit plakada oluşan şekil değiştirmeleri hesaplayan yarı ampirik bir formül geliştirmiştir. Qian ve Swanson [7] yaptıkları analitik çalışmada ankastre mesnetli dikdörtgen plakların darbe cevabı için Rayleigh Ritz prosedürünü kullanmıştır. Kim ve Kang [8] kompozit plağın dinamik şekil değiştirmesini kullanarak darbe kuvvetini hesaplamak için yeni bir analitik metod geliştirmiştir. Bazı araştırmacılar üç boyutlu sonlu eleman modelini oluşturarak, darbe kuvvetini, kompozit plakada oluşan gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri, plağın çökmesini hesaplamıştır [9-10]. Aslan vd. [11], Byun vd. [12] ve Avila vd. [13] düşük hızlı darbe deneyleri yaparak tabakalı kompozitlerin darbe davranışını araştırmışlardır. Sunulan bu çalışmada ise düşük hızlı darbeye maruz, fiber oryantasyonu $(0^0/0^0/90^0/90^0)_s$ olan E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit bir plağın dinamik davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

2. DENEYSEL PROSEDÜR

2.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit plakalar Izoreel Firmasında imal edilmiştir. Kalınlığı 4.8 mm, fiber oryantasyon açısı $(0^0/0^0/90^0/90^0)_s$ olan 8 tabakalı kompozitin fiber hacimsel oranı %57'dir. Matris malzeme CY225 epoxy ve HY225 sertleştirici 100:80 kütle oranlarında karıştırılarak elde edilmiştir. Cure işlemi 0.2 MPa basınç ve 120 °C de 4 saat sürede, post cure ise 100 °C de 2 saat sürede gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı basınçta oda sıcaklığına soğutulmuştur. Numuneler 50x150mm, 100x150mm ve 150x150 mm boyutlarında kesilerek darbe deneylerine hazırlanmıştır. Malzemenin mekanik özellikleri 50 kN yükleme kapasiteli Shimadzu AG Universal Çekme Makinesinde 0.5 mm/dak hız ile belirlenmiştir. Kayma mukavemeti için T numunesi ve Iosipescu test metodu kullanılmıştır. Interlaminar kayma mukavemetini belirlemek için "Double Notch Shear Method"

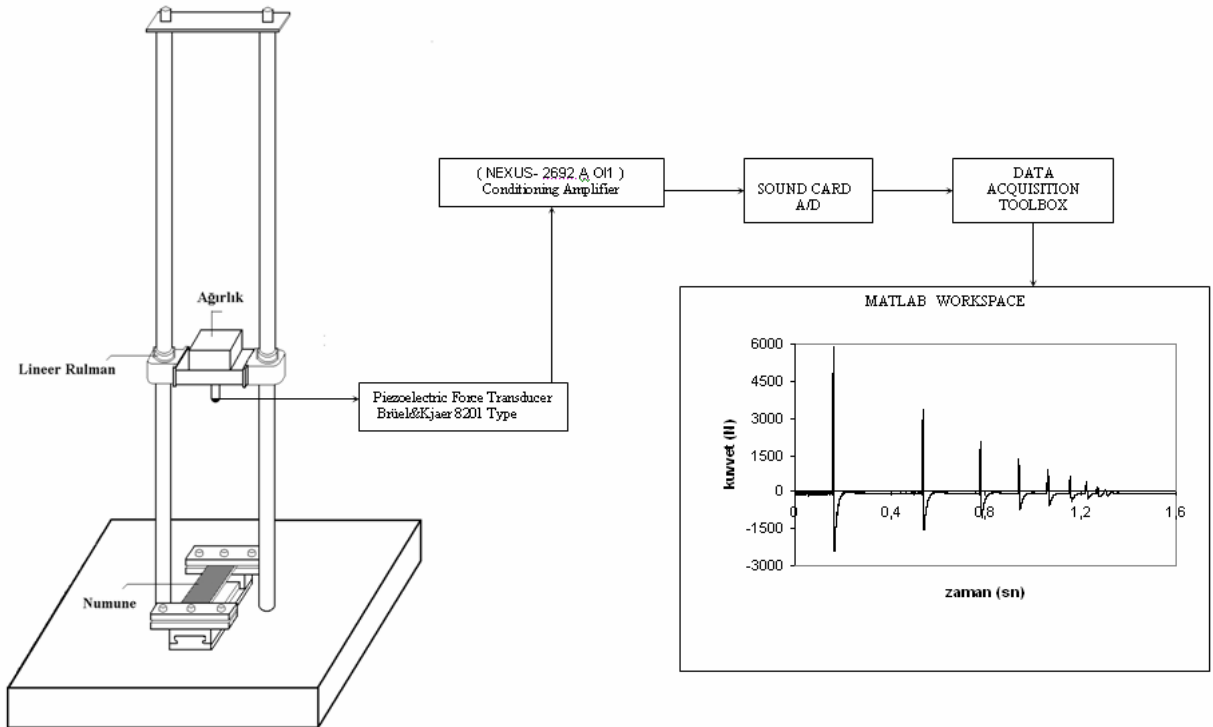
kullanılmıştır. 1 nolu yön fiber yönü, 2 nolu yön fiberlere dik yön ve 3 nolu yön tabaka kalınlık yönü olmak üzere malzemenin elastik parametreleri ve mukavemet değerleri Tablo.1’ de görülmektedir.

Tablo.1 E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozitinin mekanik özellikleri.

Sembol	Değer	Özellik
V_f	57 %	fiber hacim yüzdesi
ρ	1.506 gr/cm ³	yoğunluk
E_1	44 GPa	fiber doğrultusunda elastisite modülü
E_2	10.5 GPa	fiberlere dik doğrultuda elastisite modülü
G_{12}	3.7 GPa	kayma modülü (45° off-Axis Test)
ν_{12}	0.36	Poisson oranı
X_t	800 MPa	fiber doğrultusunda çekme mukavemeti
Y_t	50 MPa	fiberlere dik doğrultuda çekme mukavemeti
X_c	350 MPa	fiber doğrultusunda basma mukavemeti
Y_c	125 MPa	fiberlere dik doğrultuda basma mukavemeti
S	60 MPa	kayma mukavemeti
S_i	35 MPa	interlaminar kayma mukavemeti

2.2 Ağırlık Düşürme Test Makinesi

Düşey konumlandırılmış bir ağırlık düşürme test makinesi, düşük hızlı darbe testleri yapmak üzere mekanik laboratuvarında geliştirilmiştir (Şekil.1). 20 kN kuvvet ölçme kapasitesine sahip Brüel&Kjaer 8201 tipi piezoelektrik kuvvetölçer 18 mm çapında yarıküresel uçlu çarpma kafasına bağlanmıştır. Piezoelektrik kuvvetölçerden alınan sinyaller NEXUS-2692 A O11 tipi amplifikatöre aktarılmaktadır. Amplifikatör ise bilgisayara bağlıdır ve bilgisayar ses kartı ile Matlab Data Acquisition Toolbox kullanılarak kuvvet zaman dataları elde edilmektedir.

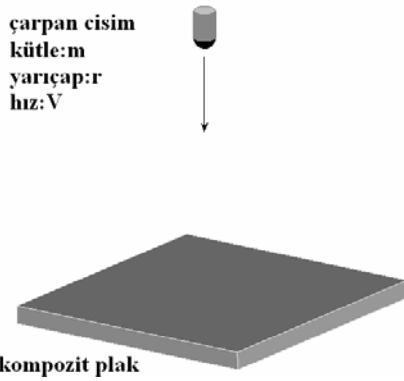


Şekil.1 Düşük hızlı darbe deney düzeneği.

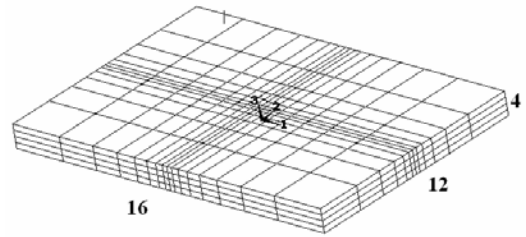
3. NÜMERİK PROSEDÜR

3.1 Sonlu Eleman Modeli

Zamana bağlı dinamik sonlu eleman analizi yapabilen 3DIMPACT programını kullanarak tabakalı kompozitlerin nümerik değerlendirmesi yapılmıştır. 3DIMPACT bilgisayar programı sürekli fiber takviyeli, farklı sınır şartlarına sahip tabakalı kompozit plakların zamana bağlı dinamik analizini yapabilmektedir. Düşük hızlı darbe problemi modeli Şekil.2’de görülmektedir. Sekiz düğümlü brick elemanlar kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil.3’de görülmektedir. Tabakalı kompozitin sonlu eleman modelinde kalınlık doğrultusunda 4 eleman olmak üzere toplam $16 \times 12 \times 4 = 768$ eleman kullanılmıştır. Newmark integrasyon metodunu, Newton-Raphson iterasyonunu ve Hertzian Contact Yasasını kullanarak kompozit plaka ve çarpma kafası arasındaki temas kuvvetini, plağın merkezindeki düşey yer değiştirmeyi, darbe esnasındaki gerilmeleri ve birim şekil değiştirmeleri zamana bağlı olarak hesaplayan 3DIMPACT kodu Wu ve Chang [14,15,16] tarafından oluşturulmuştur.



Şekil.2 Düşük hızlı darbe problemi modeli.



Şekil.3 Sonlu eleman modeli.

3.2 Hasar Analizi

Hasar analizinde “Critical Matrix Cracking Criterion” ve “ Impact Induced Delamination Criterion” kullanılmıştır. Tabakalı kompozitlerde darbe hasar mekanizması çok karmaşık bir olgudur. Oluşan hasarı tahmin edebilmek için Choi ve Chang [15] darbe hasarı üzerine bir çalışma yapmışlar, tabakalı kompozitlerde darbe hasarının oluşumunu açıklamışlardır. Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerde ilk olarak matris malzemede bir çatlak oluşur. Oluşan çatlak tahmin etmek için Choi ve arkadaşları [14] tarafından kurulan “Critical Matrix Cracking Criterion” 3DIMPACT bilgisayar programında kullanılmıştır. Kriter aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\left(\frac{\bar{\sigma}_{yy}}{\bar{Y}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{\sigma}_{yz}}{\bar{S}_i} \right)^2 = e_M^2$$

$$e_M \geq 1 \text{ Hasarlı}$$

$$e_M < 1 \text{ Hasarsız}$$

$$\bar{\sigma}_{yy} \geq 0 \Rightarrow {}^n Y = {}^n Y_t$$

$$\bar{\sigma}_{yy} < 0 \Rightarrow {}^n Y = {}^n Y_c$$

\bar{S}_i : tabakalar arası kayma mukavemeti
 \bar{Y}_t : fiberlere dik doğrultuda çekme mukavemeti
 \bar{Y}_c : fiberlere dik doğrultuda basma mukavemeti
 $\bar{\sigma}_{yy}, \bar{\sigma}_{yz}$: 3DIMPACT ile hesaplanan gerilmeler
 n : incelenen tabakanın numarası

Tabakalardan birinin içinde kritik matris çatlakları oluşursa bu çatlaktan başlayan bir delamination yani tabakaların ayrışması hasarı oluşabilir. Darbe ile oluşan delamination hasarını başlatan iki tip kritik çatlak vardır. Birincisi tabakaların içinde oluşan kayma ile oluşan çatlak, ikincisi ise tabakalı kompozitin alt yüzeyinden başlayan eğilme çatlakları (Şekil.4). Düşük hızlı darbe yüklemesi ile oluşan delamination şekli ise Şekil.5’de görülmektedir.

Darbe ile oluşan delamination hasarını tespit etmek için Choi ve Chang [15]’in geliştirdiği “Impact Induced Delamination Criterion” 3DIMPACT programında kullanılmıştır. Kriter aşağıda görülmektedir:

$$D_a \left[\left(\frac{\sigma_{yz}}{S_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yy}}{Y} \right)^2 \right] = e_D^2$$

$$e_D \geq 1 \text{ Hasarlı}$$

$$e_D < 1 \text{ Hasarsız}$$

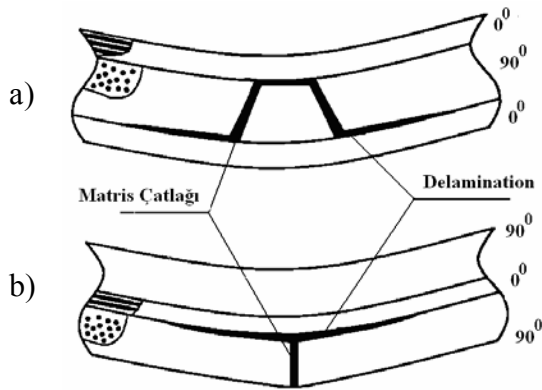
$$\bar{\sigma}_{yy} \geq 0 \Rightarrow {}^{n+1}Y = {}^{n+1}Y_t$$

$$\bar{\sigma}_{yy} < 0 \Rightarrow {}^{n+1}Y = {}^{n+1}Y_c$$

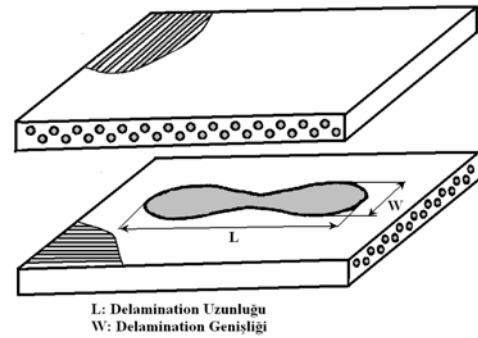
Da deneylerle belirlenen ampirik bir sabittir. Bu çalışmada kullanılan cam lifi/epoksi kompoziti için Da 1.0 olarak seçilmiştir [17-20].

3DIMPACT bilgisayar programı ile düşük hızlı darbe hasarını belirlemek için prosedür şöyledir:

- Her bir tabakada zamana bağlı olarak dinamik gerilmeler bulunur.
- Her bir tabakada kritik matris çatlakları olup olmadığını tespit etmek için matris hasar kriteri uygulanır.
- Eğer tabakalardan birinde matris çatlakları meydana gelirse, delamination hasar kriteri incelenen tabakanın alt ve üst yüzeyi için uygulanır.



Şekil.4 Fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde düşük hızlı darbe hasarı
a) kayma çatlakları ile oluşan delamination
b) eğilme çatlakları ile oluşan delamination

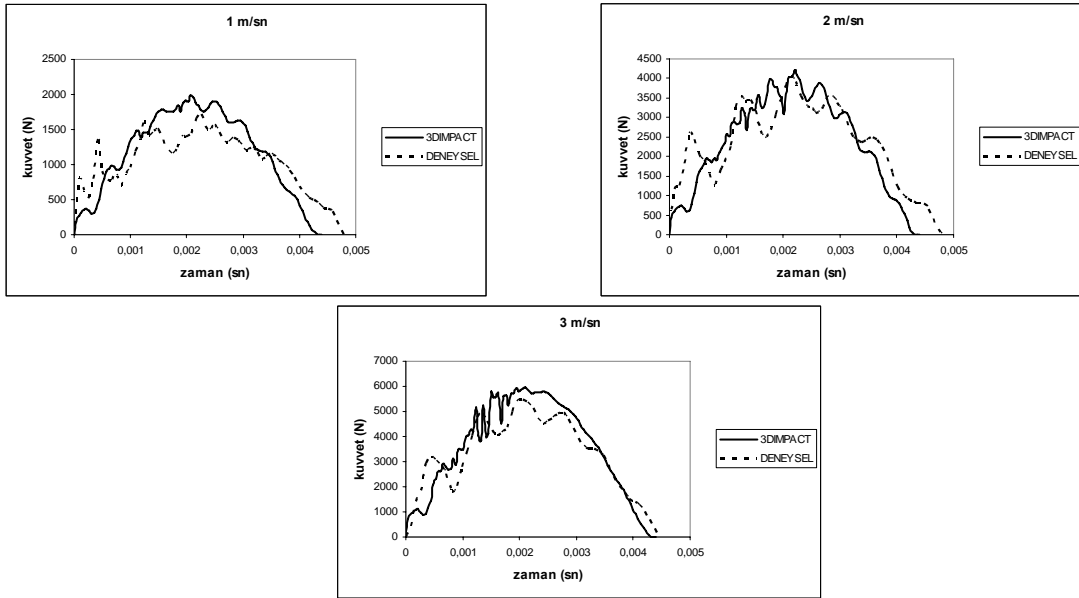


Şekil.5 Düşük hızlı darbe ile tabakalı kompozitde oluşan tipik delamination hasarı.

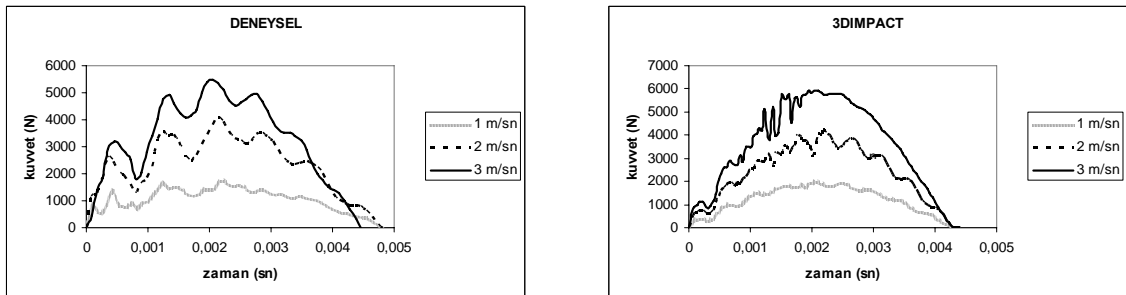
4. SONUÇLAR

4.1 Hız Etkisi

Tabakalı kompozit plakta darbe hızının etkisini çalışmak için 1 m/sn, 2m/sn ve 3m/sn hız değerlerinde deney yapılmıştır. Numunelerin iki kenarı ankastre mesnetli ve diğer iki kenarı serbesttir. Darbe kütlesi 2600 gr ve plak boyutu 150x150 mm’de sabit tutulmuştur. Deneysel ve nümerik kuvvet zaman değerleri Şekil.6’da görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Bu hızlarda ölçülen maksimum temas kuvvetleri sırası ile 1712 N, 4064 N ve 5494 N’dur. Farklı hızların deneysel ve nümerik karşılaştırması ise Şekil.7’de görülmektedir. Her üç hız içinde nümerik olarak hesaplanan darbe kuvveti değeri, deneysel bulunan darbe kuvveti değerinden daha büyüktür. Bunun nedeni deneylerde ankastre sınır şartının tam olarak sağlanamamasından kaynaklanabilir. Her üç hız içinde nümerik olarak bulunan darbe süreleri, deneysel darbe sürelerinden daha küçüktür. 3m/sn hız için diğerlerine kıyasla yükleme esnasında oldukça yüksek frekans osilasyonu olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yükleme esnasında hasarlar oluşmaktadır ve yük kalktıktan sonra bu osilasyonların bittiği görülmektedir. Bu durum maksimum darbe yükünden sonra hasar gelişiminin bittiğini göstermektedir [21].



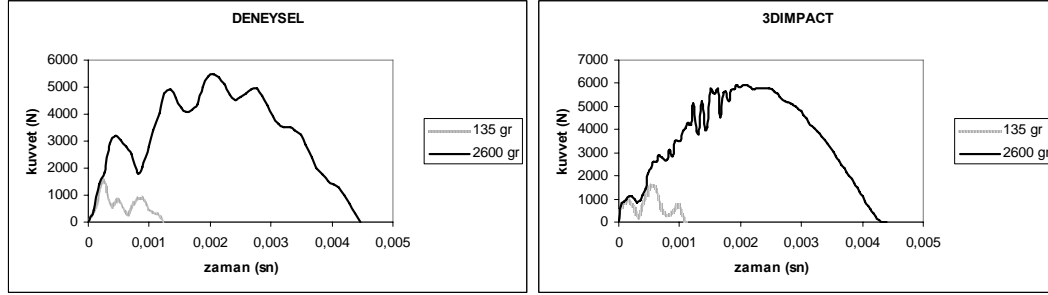
Şekil.6 Farklı hızlar için darbe kuvveti-zaman diyagramı (m=2600 g, 150 mm x 150 mm).



Şekil.7 Farklı hızlar için darbe kuvveti-zaman değerlerinin karşılaştırılması (m=2600 g, 150 mm x 150 mm).

4.2. Kütle Etkisi

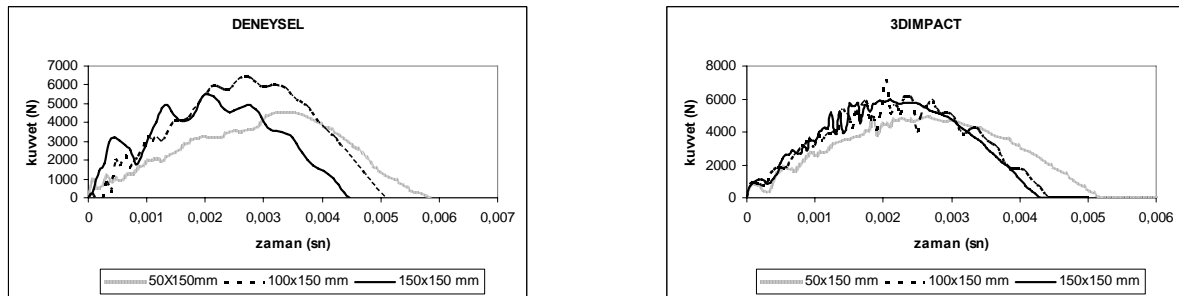
Darbe kütlesinin etkisini araştırmak için iki farklı kütle seçilmiştir (135 gr ve 2600 gr). Darbe hızı 3 m/sn ve plak boyutu 150x150 mm' de sabit tutulmuştur. Deneysel ve nümerik karşılaştırmalar Şekil.8'de görülmektedir. Darbe kütlesinin artışı ile darbe zamanı artmaktadır. Darbe kütlesinin değişimi ile elde edilen kuvvet zaman eğrileri şekilsel olarak birbirinden oldukça farklıdır.



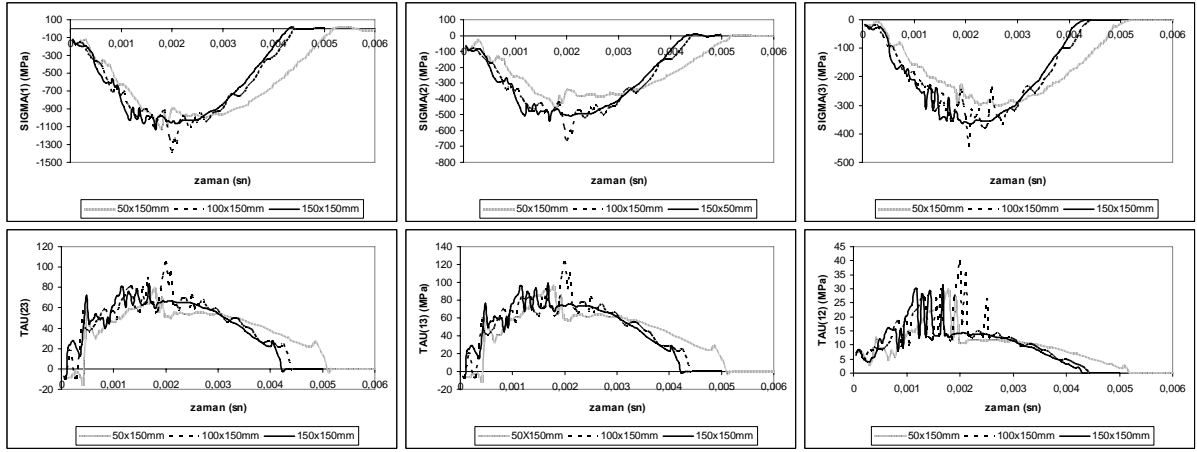
Şekil.8 Farklı kütleler için darbe kuvveti-zaman diyagramı (3 m/sn, 150 mm x 150 mm).

4.3. Boyut Etkisi

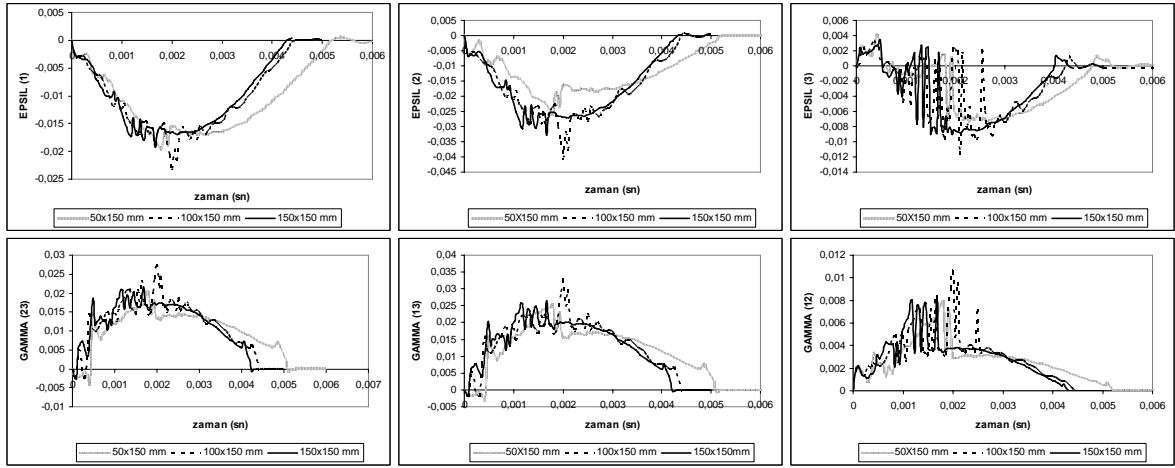
Düşük hızlı darbeye maruz kompozit plağın boyut etkisini araştırmak için 50x150mm, 100x150mm ve 150x150 mm boyutlarında kompozit numuneler kesilmiştir. Şekil.9'da deneysel ve nümerik olarak her üç plağın kuvvet zaman diyagramları görülmektedir. Hız 3 m/sn ve kütle 2600 gr' da sabit tutulmuştur. Kompozit plakların dar kenarları ankastre olarak mesnetlenmiştir. Plak genişliği azaldıkça darbe zamanı artmaktadır. Üç plak içinde en büyük darbe kuvveti 100x150 mm' lik plakta, en düşük darbe kuvveti ise 50x150 mm' lik plakta. Tabakalı kompozit plağın üst yüzeyinin merkez noktası için $(\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12})$ ve interlaminar gerilmeler $(\sigma_3, \tau_{13}, \tau_{23})$, birim şekil değiştirmeler zamana bağlı olarak hesaplanmıştır (Şekil.10,11). Interlaminar kayma gerilmelerinde çok fazla osilasyon olduğu görülmektedir. Bu durum tabakalı kompozit plağın içinde delamination hasarının oluşabileceğini gösterir. Kayma gerilmeleri normal gerilmeler ile kıyaslanırsa oldukça küçüktür. σ_1 gerilmesi ise σ_2 den çok büyüktür. Bunun nedeni esnek dalgalar fiber yönünde yani 1 yönünde daha hızlı hareket eder. Benzer sonuçlar Wu ve Chang [16], Chun ve Lam [22] tarafından da bulunmuştur. Şekil.12' de ise plağın ortasındaki çökme her üç plak boyutu için hesaplanmıştır. En büyük çökme 50x150 mm boyutlu plakta bulunmuştur.



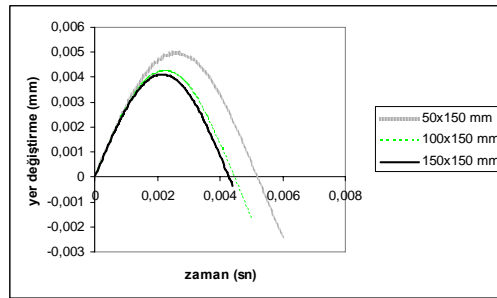
Şekil.9 Farklı boyutlar için darbe kuvveti-zaman diyagramı (m=2600 g, 3 m/sn).



Şekil.10 Farklı boyutlar için gerilmeler ($m=2600$ g, 3 m/sn).



Şekil.11 Farklı boyutlar için birim şekil değiştirmeler ($m=2600$ g, 3 m/sn).



Şekil.12 Farklı boyutlar için plağın çökme değerleri ($m=2600$ g, 3 m/sn).

Şekil 13'te ise tabakalar arası oluşan delamination hasarı her üç plak boyutu için verilmiştir. En büyük delamination hasarı kompozit plağın alt bölgesinde 6 nolu ara yüzeyde meydana gelmektedir. Çünkü 6 nolu ara yüzeyde iki komşu tabakanın fiber takviye açısı 90^0 ve 0^0 dir. 7 nolu ara yüzeyde ise iki komşu tabakanın fiber takviye açısı aynıdır (0^0 ve 0^0).



Şekil.13 Farklı boyutlar için delamination hasarı (m=2600 g, 3 m/sn).

5. SONUÇ

Düşük hızlı darbeye maruz fiber takviyeli tabakalı kompozitin dinamik davranışı deneysel ve nümerik olarak değerlendirilmiştir. Darbe kütleinin artışı ile darbe zamanı artmaktadır. Darbe kütleinin değişimi ile elde edilen kuvvet zaman eğrileri şekilsel olarak birbirinden oldukça farklıdır. En büyük darbe kuvveti üç plak içinde 100x150mm'lik plakta elde edilmiştir. Ve en büyük delamination hasarı 100x150 mm'lik plaktır. Tabakalar arasında en büyük delamination hasarı kompozit plağın alt bölgesinde ve fiber takviye açılarının farklı olduğu iki tabaka arasında meydana gelmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Rotem, A., ve Lifshitz, J.M., "Longitudinal strength of unidirectional fibrous composite under high rate of loading" Proc. 26th Annual Tech. Conf. Soc. Plastics Industry, Reinforced Plastics, Composites Division, Washington, DC, Section 10-G,1-10, 1971.
- [2] Lifshitz, J.M., "Impact strength of angle ply fiber reinforced materials" Journal of Composite Materials 10, 92-101, 1976.
- [3] Sierakowski, R.L., Nevil, G.E., Ross, A., ve Jones, E.R., "Dynamic compressive strength and failure of steel reinforced epoxy composites" Journal of Composite Materials 5 362-377, 1971.
- [4] Sierakowski, R.L., ve Chaturvedi, S.K., "Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites" Wiley-1997.
- [5] Abrate, S., "Impact on composite structures" Cambridge University Press-1998.
- [6] Sankar, B.V., "Scaling of low-velocity impact for symmetric composite laminates" Journal of Reinforced Plastics Composites 11, 297-305,1992.
- [7] Qian, Y., ve Swanson, S.R., "A comparison of solution techniques for impact response of composite plates" Composite Structures 14, 177-192,1990.
- [8] Kim, J.K., ve Kang, K.W., "An analysis of impact force in plain-weave glass/epoxy composite plates subjected to transverse impact" Composites Science and Technology, 61, 135-143, 2001.
- [9] Besant, T., Davies, G.A.O., ve Hitchings, D., "Finite element modelling of low velocity impact of composite sandwich panels" Composites: Part A 32, 1189-1196, 2001.
- [10] Jiang D., Shu D., "Stress distribution in damaged composite laminates under transverse impact", Composite Structures 63, 407-415,2004.
- [11] Aslan, Z., Karakuzu, R., Sayman, O., "Dynamic characteristics of laminated woven E-glass/epoxy composite plates subjected to low velocity heavy mass impact," Journal of Composite Materials 36, 2421-2442, 2002.
- [12] Byun J.H. Song S.W., Lee C.H., Um M.K., Hwang B.S., "Impact properties of laminated composites with stitching fibers" Composite Structures 76, 21-27,2006.
- [13] Avila A.F., Soares M.I., Neto A.S., "A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings", Int. Journal of Impact Engineering 34,28-41, 2007.
- [14] Choi, H.Y., Wu, H.Y.T., ve Chang, F.K., "A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part II- Analysis." Journal of Composite Materials 25, 1012-1038, 1991.

- [15] Choi, H.Y., ve Chang, F.K., "A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact" *Journal of Composite Materials* 26, 2134-2169, 1992.
- [16] Wu, H.Y.T., ve Chang, F.K., "Transient dynamic analysis of laminated composite plates subjected to transverse impact" *Computers & Structures* 31, 453-466, 1989.
- [17] Wang, C.Y., ve Yew, C.H., "Impact damage in composite laminates" *Compt.& Struct.* 37, 967-982. 1990.
- [18] Liu, S., "Indentation damage initiation and growth of thick-section and toughened composite materials" ASME Publication, AD-Vol.37, AMD-Vol.179, 103-116. (1993).
- [19] Liu, S., Kutlu, Z., ve Chang, F.K., "Matrix cracking and delamination propagation in laminated composites subjected to transversely concentrated loading" *Journal of Composite Materials* 27, 436-470. (1993).
- [20] Liu, S., Kutlu, Z., ve Chang, F.K., "Matrix cracking-induced stable and unstable delamination propagation in graphite/epoxy laminated composites due to a transversely concentrated load." *ASTM STP*, 1156, 86-101. 1993.
- [21] Wang, H., & Vukhanh, T., "Damage extension in carbon fibre/PEEK cross ply laminates under low velocity impact" *Journal of Composite Materials* 28, 684-707. (1994).
- [22] Chun, L., ve Lam, K.Y., "Dynamic response of fully-clamped laminated composite plates subjected to low-velocity impact of a mass". *International Journals of Solids and Structures* 35, 963-979, 1998.

